

УДК 621.384.8

РАЗРАБОТКА СЕТИ КОНТРОЛЛЕРОВ CONTROLLER AREA NETWORK (CAN) ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МАСС-СПЕКТРОМЕТРОМ МТИ-350Г

*А.Б.Малеев, Д.В.Новиков, А.В.Сапрыгин
Уральский элетрохимический комбинат
624130, Новоуральск Свердловской обл., Дзержинского, 2
czl@ueip.ru*

Описаны основные сведения о последовательном протоколе информационного обмена сети CAN и алгоритмы функционирования сети. Приведено краткое описание использования сети CAN в системе управления и информационного обмена масс-спектрометра МТИ-350Г

В 1999 г. перед коллективом разработчиков была поставлена задача по созданию нового специализированного масс-спектрометра для изотопного анализа урана в газовой фазе (в гексафториде урана) МТИ-350Г. Одной из задач по созданию прибора была задача выбора способа связи узлов масс-спектрометра с управляющей ЭВМ и разработка протокола информационного обмена, удовлетворяющего требованиям большой пропускной способности и высокой надежности. В результате выполнения этой задачи была разработана система управления, базирующаяся на использовании шины CAN (Controller Area Network).

Выбор протокола связи масс-спектрометра с компьютером

При проектировании электронной части и специализированного программного обеспечения перед коллективом разработчиков встал вопрос о выборе шины и протокола связи электронных блоков прибора с управляющей ЭВМ. Был проанализирован опыт отечественных и зарубежных производителей аналогичных приборов. Однако используемые другими производителями шины оказались неприемлемы для разрабатываемого прибора.

В приборах серии МИ-1201 производства ЗАО "Селми" используется расширитель шины ISA [1, 2, 3], позволяющий выделить адреса устройств ввода – вывода компьютера для управления блоками через параллельный интерфейс. Недостаток такого способа заключается в громоздкости и недостаточной длине нестандартного последовательного интерфейса, а также в замеченных при эксплуатации сбоях, вызываемых ненадежностью многоконтактных разъемных соединений. Кроме того, в современных компьютерах прекращается использование шины ISA для подключения плат расширения, что не позволит использовать такой интерфейс в ближайшем будущем.

Во многих зарубежных приборах, в основном, до 1990 года выпуска для связи используется параллельный интерфейс GPIB [4, 5] (другие названия HP-IB, Канал общего пользования). Этот интерфейс достаточно надежен и поддерживается стандартами, но является устаревшим, а использование средств сопряжения с компьютером затруднено необходимостью постоянной загрузки центрального процессора задачей обеспечения связи с платой GPIB.

В современных зарубежных приборах используется связь через стандартный сетевой прото-

кол NetBIOS с использованием в качестве физической среды передачи коаксиального кабеля либо оптоволокну [6, 7]. Это решение является наиболее современным, отвечает требованиям обеспечения безошибочного высокоскоростного обмена, но его применение затруднено необходимостью использования единого контроллера для управления всем масс-спектрометром. Такое решение оправдано для лабораторных масс-спектрометров, но для технологического прибора, каким является МТИ-350Г, предпочтительна организация распределенного управления, при котором каждый блок является заменяемым и независимым от других и обладает своим контроллером, оснащенным приемопередатчиком.

Наиболее подходящим для технологического масс-спектрометра является использование современного последовательного интерфейса, оснащенного аппаратными и программными методами обеспечения надежности и безошибочности связи. Первоначально предполагалось использование широко распространенного и хорошо зарекомендовавшего себя протокола RS-485, осуществляющего связь посредством витой пары. Однако скоростные характеристики этого протокола не удовлетворяют пропускной способности, требуемой для интенсивного информационного обмена при проведении анализа на масс-спектрометре.

В конце 90-х годов широкое развитие получил протокол CAN, использующийся во многих отраслях, требующих высокоскоростного и надежного обмена в условиях сильных помех. После анализа характеристик протокола и доступности аппаратных средств разработчиками было принято решение об использовании протокола CAN в системе управления и обработки информации масс-спектрометра МТИ-350Г.

Основы протокола CAN

Идея создания Controller Area Network (CAN) появилась в конце 80-х годов у Роберта Боша. Решение задачи создания высокоскоростной и помехоустойчивой системы для распределенных систем, работающих в реальном времени, было необходимо для конструирования высокотехнологичной автомобильной электроники. Для таких систем жизненно необходимо обеспечить работоспособность системы с высокой скоростью в условиях сильных помех, с возможностью распределения приоритета сообщений в зависимости от их важности, а также возможность работы системы в целом без ошибок и задержек при отклю-

чении отдельных узлов. Разработанный фирмой Bosch стандарт был подхвачен и дополнен производителями систем автоматизации технологических процессов.

CAN – последовательный протокол связи, обладающий высоким уровнем надежности информационного обмена. Основные характеристики и принципы построения закреплены в стандарте ISO 11898. Используется для связи в передвижных системах, автомобилях, технологическом оборудовании и системах промышленной автоматизации. Максимальная длина кабеля – 10000 метров. Максимальная скорость передачи в соответствии со стандартом составляет 1 Мбит/с. Получение столь высокой скорости стало возможным благодаря применению механизма неструктивного арбитража шины. В табл. 1 приведены данные о соотношении между скоростью обмена и максимальной длиной кабеля шины CAN.

Таблица 1
Соотношения стандартных скоростей обмена и длины кабеля шины CAN

Скорость CAN, кбит/с	Максимальная длина кабеля, м
1000	40
500	130
250	270
125	530
100	620
50	1300
20	3300
10	6700
5	10000

Теоретически возможна организация связи со скоростью 1,6 Мбит/с, но данная величина не включена в стандарт.

В наиболее распространенном варианте узлы CAN соединяются между собой при помощи линии связи из двух проводов CAN_L и CAN_H (витая пара). При уровне сигнала CAN_L ниже CAN_H регистрируется логический ноль, в обратном случае – логическая единица. Также стандартом предусмотрено соединение при помощи оптических линий связи, по инфракрасному каналу или радиоканалу. При таких типах соединений не требуется изменения протокола, нужно лишь использовать соответствующие приемопередающие устройства, подключенные к стандартному контроллеру CAN. Все приведенные примеры работы контроллера будут рассмотрены применительно к двухпроводной линии связи.

Передача данных происходит в широковещательном режиме, то есть все работающие контроллеры могут получать сообщения, проходящие по шине. Адресация сообщения может осуществляться как отдельному узлу, так и группе узлов (или всем). Возможность реагирования узла сети CAN на адресованные ему сообщения обеспечивает аппаратная фильтрация контроллера. Для передачи сообщения контроллер следит за состоянием шины и при ее незанятости начинает передачу, в то же время осуществляя проверку правильности прохождения информации. При возникновении ситуации одновременной передачи информации несколькими контроллерами контроллер узла с высшим приоритетом продолжает передачу, а контроллер узла с низшим приоритетом прекращает и ждет окончания цикла передачи. Так как выходы всех контроллеров соединены по принципу "монтажное И", то при выдаче одним контроллером сигнала логического нуля, а другим – логической единицы на выходе будет ноль. Контроллер с низшим приоритетом обнаружит, что присутствующий на шине сигнал не соответствует выдаваемому, и прекратит передачу. Описанный механизм неструктивного арбитража проиллюстрирован на рис. 1. (Если быть более точным, то в стандарте CAN указываются два состояния сигнала шины – доминантное и рецессивное, что позволяет использовать одну логику для различных реализаций физического уровня).

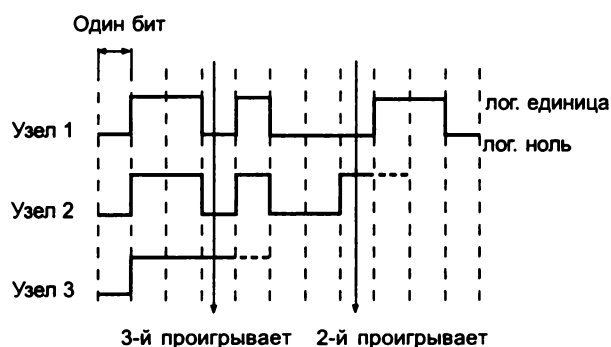


Рис.1. Неструктивный побитовый арбитраж шины CAN

CAN использует следующие способы обнаружения и коррекции ошибок:

- Bit monitoring
- Bit stuffing
- Frame check
- ACKnowledgement Check
- CRC Check

Bit monitoring – как проиллюстрировано выше, каждый узел во время передачи битов в сеть сравнивает значение передаваемого им бита со зна-

чением бита которое появляется на шине. Если эти значения не совпадают, то узел генерирует ошибку Bit Error.

Bit stuffing – при последовательной передаче узлом 5 бит с одинаковым значением автоматически добавляется шестой бит с противоположным значением. Соответственно при приеме такого сообщения этот дополнительный бит автоматически удаляется. При появлении более пяти бит с одинаковым значением генерируется ошибка Stuff Error.

Frame Check – как будет показано ниже, отдельные части (поля) сообщения имеют одинаковое значение во всех типах сообщений. При нарушении формата генерируется ошибка Form Error.

ACKnowledgement Check – после получения правильного сообщения узел – приемник выставляет на шине доминантный бит в том месте, где передатчиком выставлен рецессивный. В противном случае передатчик регистрирует ошибку Acknowledgement Error.

CRC Check - каждое сообщение комплектуется контрольной суммой CRC. Каждый узел независимо подсчитывает значение CRC текущего сообщения и сравнивает с передаваемым. При несовпадении этих значений узел – приемник генерирует ошибку CRC Error.

Кроме того, в CAN реализован Механизм ограничения ошибок (Error confinement).

Этот механизм заключается в том, что при обнаружении любой из пяти перечисленных ошибок узел передает в сеть Error Frame, при появлении которого прекращается прием текущего сообщения. Каждый узел также подсчитывает ошибки передачи и ошибки приема в специальных счетчиках, причем ошибка передачи обладает большей значимостью, чем ошибка приема. Когда количество ошибок превышает заданный предел, узел, являющийся основным источником ошибок, отключается от сети.

Для передачи информации по шине CAN используются четыре типа кадров (или фреймов):

- кадр данных (data frame) – основной способ общения узлов сети, содержит данные, передаваемые от источника приемникам;
- кадр удаленного запроса (remote frame) – используется для запроса данных от удаленного узла;
- кадр ошибки (error frame) – передается при обнаружении ошибки на шине;
- кадр перегрузки (overload frame) – передается для задержки передачи кадров данных или кадра удаленного запроса, если узел не успел обработать полученные ранее данные.

Кадры ошибки и перегрузки формируются контроллерами автоматически, в то время как кадры данных и кадры удаленного запроса используются для обеспечения информационного обмена.

Стандарт CAN предусматривает два типа формата кадров: стандартный, содержащий 11-битный идентификатор и описанный в части А спецификации CAN, и расширенный, с 29-битным идентификатором, описанный в части В.

Для системы управления и обработки информации масс-спектрометра МТИ-350Г используются стандартный формат кадра. На рис.2 приведен формат кадра данных шины CAN.

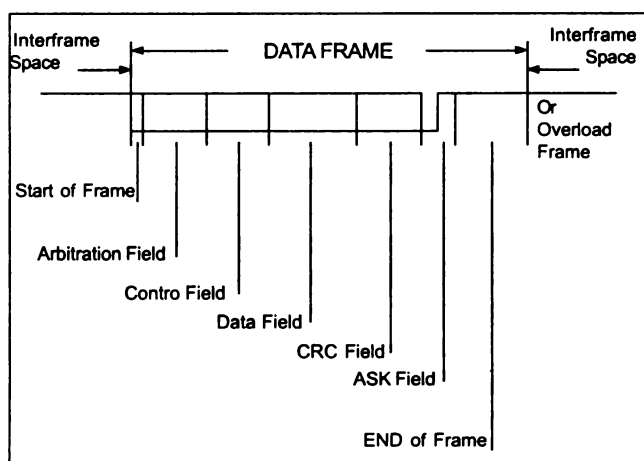


Рис.2. Формат кадра CAN

В кадре первым идет поле арбитража (Arbitration Field), содержащее идентификатор (Identifier) сообщения. Поэтому идентификатор сообщения однозначно определяет его приоритет в соответствии с алгоритмом, проиллюстрированным на рис. 1. Идентификатор состоит из 11 бит и передается, начиная со старшего бита. В поле арбитража после идентификатора передается RTR бит (Remote Transmission Request). Этот бит определяет тип кадра: в кадре данных RTR=0, в кадре удаленного запроса RTR=1 (рис.3).

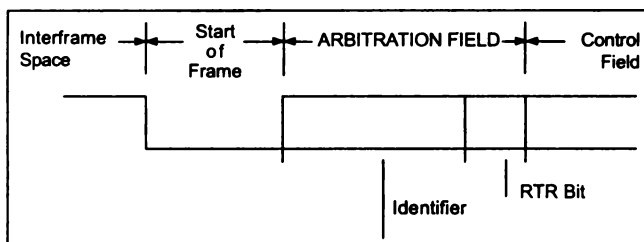


Рис.3. Поле арбитража

За полем арбитража идет поле контроля (Control Field), содержащее код длины данных DLC

(Data Length Code). Код длины данных информирует о количестве байт данных, передаваемых в кадре. Два начальных бита зарезервированы для будущего использования (рис.4).

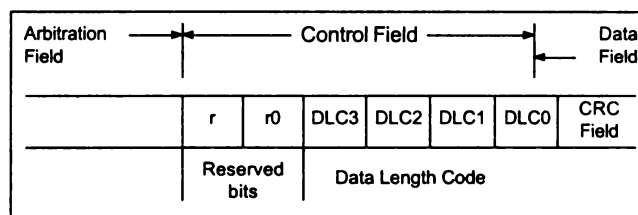


Рис.4. Поле контроля

Данные (если они есть), передаются в поле данных (Data Field). Формат передаваемых данных определяется разработчиком системы. Максимальный объем передаваемых данных в одном кадре – 8 байт.

Поле контрольной суммы (CRC Field). 15 битный циклический код вычисляется по значению полей арбитража, контроля и данных и посылается передатчиком. Все приемники вычисляют CRC и сверяют с переданным значением. При несовпадении значений передатчику сообщается об ошибке при помощи кадра ошибки, и тогда передатчик автоматически повторяет сообщение. Контрольная последовательность (CRC Sequence) сопровождается разделителем (CRC Delimiter) (рис.5).

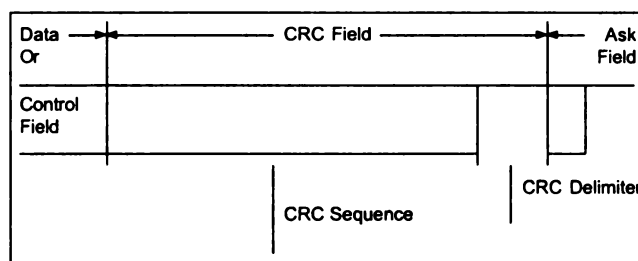


Рис.5. Поле контрольной суммы

В конце сообщения передается поле подтверждения (ACK Field), состоящее из области подтверждения (ACK Slot) и разделителя (ACK Delimiter). Передатчик всегда передает в поле ACK рецессивный бит. При чтении сообщения приемник во время приёма бита ACK посылает на шину доминантный бит, подтверждая тем самым прием сообщения.

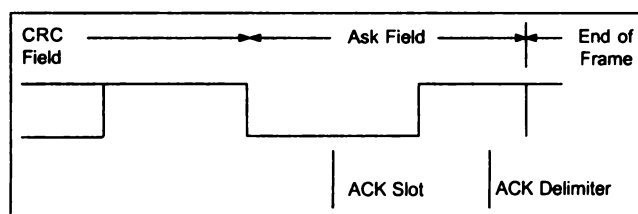


Рис.6. Поле подтверждения

Описанные выше механизмы позволяют с высокой степенью надежности передавать сообщения в условиях сильных помех. В соответствии с подсчетами вероятность появления необнаруженной ошибки составляет $4,7 \cdot 10^{-11}$. Это означает, что при работе шины со скоростью 1 Мбит/с 365 дней в году по 8 часов при 50% загрузке одна ошибка возникает раз в 1000 лет.

Использование протокола высокого уровня

Стандарт CAN не определяет правила передачи сообщений в сети, адресации узлов и распределения идентификаторов, не рассматривает возможность передачи данных длиной более 8 байт. Указанные задачи решаются в рамках спецификаций так называемых протоколов верхнего уровня CAN-сетей (HLP - Higher Level Protocol).

На данный момент разработано большое число протоколов верхнего уровня: CAL/CANopen, OSEK/VDX, SAE J1939, DeviceNet, SDS, CAN-Kingdom, NMEA2000, в основе которых лежит канальный протокол CAN2.0.

Наибольшее распространение в настоящее время получили следующие протоколы:

CAL – CAN Application Level, и разработанный на его основе CANopen, выпущенный организацией CAN In Automation. Поддерживает скорости передачи данных: 1 Мбит/с, 800 Кбит/с, 500, 250, 125, 50, 20 и 10 Кбит/с. Поддержка скорости 20 Кбит/с является обязательной для всех модулей. Узлы CANopen обмениваются между собой объектами-сообщениями. Управление работой сети занимается мастер – устройство, осуществляющее инициализацию устройств, их периодическую переключку, контроль ошибок. Первоначально CANopen предназначался для управления механизмами в системах промышленной автоматизации. Однако впоследствии протокол нашел применение в медицине, морской электронике, на транспорте и в системах автоматизации зданий.

SDS (Smart Distributed System) – разработка компании Honeywell Inc. (Micro Switch Division).

Представляет собой недорогое и законченное решение для сетевого управления интеллектуальными датчиками и исполнительными устройствами от центрального контроллера в системах промышленной автоматизации. Определены скорости 1 Мбит/с, 500, 250 и 125 кбит/с.

CAN Kingdom – протокол шведской компании KVASER-AB. Основной целью создания протокола было предоставление системному разработчику максимальной свободы в реализации своих идей при построении сети, сохранив при этом возможность использования стандартных модулей от независимых производителей. Интуитивно понятное описание протокола ориентировано на возможность разработки системы неподготовленными пользователями. Ограничения на используемые скорости нет, но определено использование скорости 125 кбит/с при инициализации устройств.

DeviceNet – протокол, разработанный и опубликованный в 1994 году компанией Allen-Bradley корпорации Rockwell и впоследствии переданный в ведение специально организованной для его поддержки ассоциации ODVA (Open DeviceNet Vendor Association Inc.). DeviceNet – недорогое, простое и эффективное решение для объединения разнообразных устройств промышленной автоматизации независимых производителей в единую систему. Разрешенные скорости ограничены тремя значениями: 500, 250 и 125 Кбит/с. Обеспечивает возможность “горячего” подключения и отключения устройств сети (без прекращения работы и обесточивания узлов). Для передачи данных длиной более 8 байт используется фрагментация сообщений. Обладает продуманной системой идентификаторов, сообщения разбиты на три группы, поэтому каждый узел может иметь некоторое множество идентификаторов, входящих в состав трех групп. Приоритет сообщения определяется группой и номером узла (MAC ID) в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Распределение идентификаторов DeviceNet

	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Group 1	0	Group 1 Message ID				Source MAC ID					
Group 2	1	0	MAC ID						Group 2 Message ID		
Group 3	1	1	Group 3 Message ID			Source MAC ID					
Group 4	1	1	1	1	1	Group 4 Message ID					

Для системы управления и сбора информации масс-спектрометра МТИ-350Г был разработан

свой протокол, использующий некоторые элементы DeviceNet. В разработанном протоколе предус-

мотрена возможность фрагментации сообщений. Поддерживаются скорости 10, 20, 50, 125, 250, 500, 800 и 1000 Кбит/с.

Способ определения идентификатора сообщения является главным архитектурным элементом CAN систем, так как идентификатор CAN-сообщения определяет относительный приоритет сообщения и, следовательно, время обработки сообщения. Это также влияет на возможность применимости фильтрации сообщения, на использование возможных коммуникационных структур и эффективность использования идентификатора.

В разработанном протоколе используется следующее распределение идентификаторов: десятый бит (SYS) определяет принадлежность сообщения к группе системных или прикладных сообщений. Системные сообщения предназначены для конфигурации, управления работой, проверки работоспособности, отладки CAN-узлов. Прикладные сообщения управляют работой электронных блоков, передают информацию прикладного характера, в том числе результаты измере-

ний. Девятый бит (PR) служит для задания приоритета сообщения. Поле с восьмого по третий бит несет в себе адрес узла внутри сети CAN (MAC ID). В состав масс-спектрометра МТИ-350Г входят следующие электронные блоки, оснащенные CAN-контроллером: блок регистрации токов БРТ, блок стабилизации индукции БСИ, блок управления клапанами БУК, контроллер системы откачки КСО, блок питания магнита БПМ, блок высокого напряжения БВН, блок питания источника БПИ и два однотипных блока индикации форвакуума БИФ, один из которых установлен в аналитической стойке (АС), другой – в стойке напуска (СН). Адреса этих блоков распределены следующим образом (в шестнадцатеричной системе): БРТ 0x0A; БСИ 0x0B; БУК 0x0C; БПМ 0x0D; КСО 0x0E; БВН 0x11; БПИ 0x12; БИФ АС 0x10; БИФ СН 0x0F.

Поле со второго по нулевой бит служит для идентификации сообщения, принадлежащего блоку, и является, по сути, кодом определенной команды (Message ID) (табл. 3).

Таблица 3

Распределение идентификаторов сети CAN масс-спектрометра МТИ-350Г

10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
SYS	PR	MAC ID						Message ID		

0	0	Адрес узла	Идентификатор сообщения	Прикладное сообщение высокий приоритет
0	1			Прикладное сообщение низкий приоритет
1	0			Системное сообщение высокий приоритет
1	1			Системное сообщение низкий приоритет

Таким образом, каждый узел может иметь до восьми сообщений в каждой из четырех групп.

В качестве иллюстрации в табл. 4 приведены коды команд блока регистрации токов (БРТ) и алгоритм работы CAN на примере информационного обмена управляющего промышленного компьютера с этим блоком.

Как видно из табл. 4, в соответствии с изложенным ранее механизмом идентификаторы сообщений распределены оптимальным способом, исключающим сбой при работе.

Информационный обмен происходит следующим образом: контроллер управляющей ЭВМ (далее – УПР) посылает в контроллер БРТ (далее – БРТ) сообщение с кодом 01_001010_001, разрешая инициативную выдачу результатов измерений БРТ. Затем УПР посылает сообщение с кодом 01_001010_000, записывая время интегрирования преобразователя. После этого УПР производит запуск преобразователя, посы-

лая сообщение с кодом 00_001010_000. БРТ производит измерение, по окончании которого выдает сообщение о готовности данных (код 00_001010_001) и результаты измерений по 1,2 каналам (код 00_001010_100), затем по 3,4 каналам (код 00_001010_101), затем по 5, 6 каналам (код 00_001010_110). Также возможна работа с выдачей результатов измерения по требованию, при этом УПР посылает сообщение с кодом 01_001010_001, запрещая инициативную выдачу результатов измерений БРТ. Затем УПР посылает сообщение с кодом 01_001010_000, записывая время интегрирования преобразователя. После этого УПР производит запуск преобразователя, посылая сообщение с кодом 00_001010_000. БРТ производит измерение, по окончании которого выдает сообщение о готовности данных (код 00_001010_001). По приему сигнала готовности УПР запрашивает данные по выбранной

паре каналов, посылая сообщение с кодом 00_001010_010. БРТ отвечает, посылая результа-

ты измерений по требуемым каналам посылкой сообщения с кодом 00_001010_011.

Таблица 4

Коды команд БРТ											Использование идентификатора
Биты идентификатора											
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
x	x	0	0	1	0	1	0	Код команды			
0	0	Адрес узла 001010b (0x0A)						0	0	0	Запуск преобразования
0	0							0	0	1	Готовность данных
0	0							0	1	0	Запрос данных n,k-ого каналов
0	0							0	1	1	Данные n,k-ого каналов
0	0							1	0	0	Данные 1,2-ого каналов
0	0							1	0	1	Данные 3,4-ого каналов
0	0							1	1	0	Данные 5,6-ого каналов
0	0							1	1	1	Резерв
0	1							0	0	0	Запись времени преобразования
0	1							0	0	1	Запрет по событию сообщений данных каналов
0	1							0	1	0	Запись дискретных сигналов
0	1							0	1	1	Чтение дискретных сигналов (запрос)
0	1							1	0	0	Данные дискретных сигналов (ответ)
0	1										

Контроллер узла CAN

В общем случае CAN – узел представляет из себя автономный электронный модуль, оснащенный микропроцессором и CAN – контроллером. Микропроцессор обеспечивает работу узла в соответствии с заложенным алгоритмом, а контроллер реализует высокоскоростной обмен между процессором и шиной CAN (прием, фильтрацию, контроль, накопление и отправку сообщений) с помощью встроенных аппаратных средств. В электронных блоках, используемых в масс-спектрометре МТИ-350Г используется универсальный контроллер, разработанный ОКБ приборного завода УЭХК. Контроллер выполнен в формате PC/104 и содержит в своем составе:

- управляющий микроконтроллер семейства MCS-51 фирмы ATMEL AT89S8252;
- схему дешифратора адреса;
- схему разделения адресного пространства ОЗУ/ПЗУ;
- электрически перепрограммируемое ПЗУ емкостью 32 Кб;
- оперативное запоминающее устройство емкостью 32 Кб;
- схему временного мультиплексирования младшего байта адреса и шины данных на микросхеме;
- схему защелки старшего байта адреса;
- схему управления доступом к внешней памя-

ти и к периферийным устройствам;

- драйвер интерфейса RS-485;
- контроллер CAN-интерфейса SJA1000 производства Philips, аппаратно поддерживающей все функции по приему, передаче, контролю сообщений шины CAN на всех стандартных скоростях;

- драйвер CAN-интерфейса и гальванические развязки CAN-магистрали;

- гальванически развязанный источник питания развязок CAN-магистрали и CAN-драйвера.

Управление работой узлов производится специализированным на базе промышленного компьютера при помощи специализированного технологического и диагностического программного обеспечения. Взаимодействие специализированного компьютера с шиной происходит при посредстве контроллера PCL-841 производства Advantech.

Для оценки работоспособности разработанной системы проводились испытания работы системы сбора и обработки информации при проведении масс-спектрометрических анализов на макете и опытных образцах масс-спектрометра МТИ-350Г. Испытания доказали полную работоспособность системы, подтвердили достаточность пропускной способности шины в наиболее насыщенных информационными потоками режимах.

Основные стандарты CAN и вопросы использо-

вания сети и контроллеров можно найти в интернете по следующим адресам: www.datamicro.ru,

www.can-cia.ru, www.can-cia.de, www.marathon.ru,
www.stzp.de, www.ixxat.de, www.bosch.de/k8/can/

ЛИТЕРАТУРА

1. Гук М. Аппаратные средства IBM PC. Энциклопедия. С-Пб: Издательство "Питер", 2000. 816 с.
2. Гук М. Аппаратные интерфейсы ПК. Энциклопедия. С-Пб: Издательство "Питер", 2003. 528 с.
3. Комплект документации масс-спектрометра МИ-1201 АГМ

4. Комплект документации масс-спектрометра ELAN 6000
5. Комплект документации масс-спектрометра MAT-262
6. Комплект документации масс-спектрометра ELEMENT-2
7. Комплект документации масс-спектрометра MAT-95

* * * * *

CAN CONTROLLER NETWORK DEVELOPMENT FOR MTI-350G MASS SPECTROMETER OPERATING
A.B.Maleev, D.V.Novikov, A.V.Saprygin

The basic information about CAN network sequential protocol of data exchange and algorithms of network functioning are given. CAN network usage within MTI-350G mass spectrometer control system and data exchange is briefly described.
